

УДК 539.3

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ПРОБИВКА ТОНКОЛИСТОВОЙ
ЗАГОТОВКИ МЕТАНИЕМ ПУАНСОНА

Ананян В.А.

Ключевые слова: магнитно-импульсная, пробивка, метание, пуансон, тонколистовой, заготовка, ИМП, матрица.

Keywords: Magneto-impulse, piercing, throwing, puncheon, light-gage, matrix.

V.A. Ananyan

Magneto-impulse thin sheet pinching of the blank by punch pin throwing

With the purpose of raising the efficiency in magneto-impulse deformation is considered thin sheet blank pinching possibility by punch pin throwing to a matrix.

During the blank throwing and separation the impact analysis and the consistency definition of the process are performed on the basis on preliminarily obtained differential equations of the punch pin movement under the influence of magneto-impulse field.

Վ. Ա. Անանյան

Բարակթիթեղյա պատրաստուկի մագնիսա-իմպուլսային ծակոտումը պուանսոնի նետումով

Մագնիսա-իմպուլսային դեֆորմացիայի օգտակար գործողության գործակցի բարձրացման նպատակով դիտարկված է բարակթիթեղյա պատրաստուկի ծակոտումը պուանսոնի նետումով մատրիցի վրա: Դուրս բերված պուանսոնի շարժման դիֆերենցիալ հավասարման հիման վրա կատարված է բարակթիթեղյա պատրաստուկի ծակոտման դինամիկայի հետազոտումը և պրոցեսի պարամետրերի որոշումը:

С целью повышения коэффициента полезного действия при магнитно-импульсном деформировании рассмотрена возможность пробивки тонколистовой заготовки метанием пуансона по матрице. На основе выведенного дифференциального уравнения движения пуансона под действием импульсного магнитного поля в процессе метания и разделения заготовки проведен анализ динамики и последовательности определения параметров процесса.

Представляет большой интерес использование возможностей магнитно-импульсного метода деформирования, который имеет ряд неоспоримых преимуществ перед известными способами. Известно, что при деформировании импульсным магнитным полем (ИМП) давление на заготовку принципиально отличается от нагружения тем, что проникновение электромагнитного поля в электропроводный материал приводит к возникновению объемно-распределенной нагрузки по толщине заготовки. Таким образом, непосредственное усилие, деформирующее заготовку, передается не каким-либо промежуточным твердым, жидким или газообразным телом, а непосредственно магнитным полем. Это позволяет формировать без повреждения предварительно полированную плоскую деталь с приданием ей сложной формы (1), формовать детали, заключенные в герметичные оболочки из стали и пластмассы (2). Метод позволяет изготавливать детали любых сложных форм, осуществлять сборочные операции, встраивать установки в автоматические линии, широко механизировать и автоматизировать операции, точнее регулировать параметры процесса, добиваться в ряде случаев высокой производительности. К недостаткам метода относятся его ограниченные энергетические возможности и недостаточная прочность существующих конструкций индукторов, что не позволяет деформировать крупногабаритные толстостенные детали, а также зависимость эффективности процесса от электропроводности заготовки.

Известен метод вырубки и пробивки метанием ИМП тонколистовой заготовки по матрице (3). При этом импульсное магнитное поле одновременно выполняет роль пуансона, а также осуществляет необходимый прижим заготовки с соударением её по матрице. Недостатком процесса является очень малый к.п.д. процесса (2-4%). Обращает на себя внимание значительность потребного усилия деформирования из-за необходимости одновременного приложения нагрузки по всему контуру разделения.

Между тем, известно, что тонкую заготовку можно разделить и без прижима её по матрице, например, обычными ножницами. Такое разделение удастся осуществить с меньшими усилиями благодаря приложению всего усилия не одновременно по площади среза всего контура детали, а по площади среза в некоторой точке контура будущей детали с последовательным продолжением разделения по всему контуру.

В этой связи видится использование комбинации непосредственного деформирования заготовки ИМП с одновременным деформированием жестким пуансоном, метаемым ИМП по матрице. При таком способе деформирования осуществление процесса вырубки-пробивки потребует значительно меньше электроэнергии, чем при непосредственном деформировании ИМП. Особенностью конструкций пуансонов является наличие скоса поверхности, заключенной в срезающем контуре, а также наличие игольчатых выступов на нём (фиг.1,б). В случае разных переходов контура раздела можно иметь 2 или более игольчатых выступов.

Для ведения технологического процесса необходим расчет скоростей соударения пуансона по матрице, а следовательно, и кинетической энергии соударения с целью обеспечения необходимого процесса деформирования. Выведем дифференциальное уравнение движения пуансона, выстреливаемого действием давления ИМП. В условиях определенных допущений наведённые токи на торцевой поверхности цилиндрического пуансона представим зеркальным отображением токов обмотки плоского индуктора (фиг.1,а). Противостоящая обмотке индуктора кольцевая часть поверхности пуансона представлена из отдельных витков и их количество равно количеству (w) витков индуктора. Для конкретности схемы и в расчетах примем $w = 10$, что соответствует действительному количеству витков обмотки индуктора, используемых в экспериментальных исследованиях.

Запишем вектор силы взаимодействия между i -ым и k -ым витками, если предварительно принять, что наведённые на торце пуансона токи равны токам в обмотке индуктора

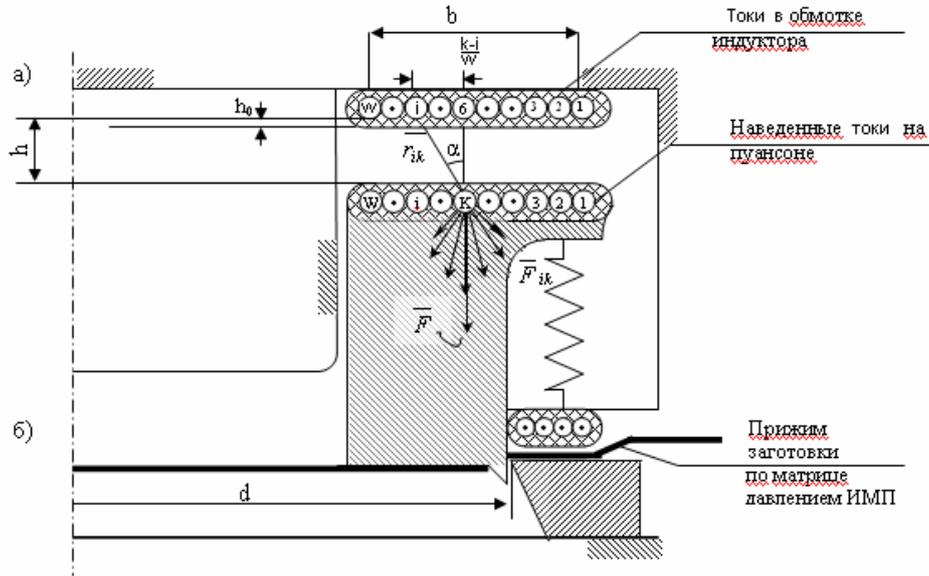
$$\vec{F}_{ik} = 2cJ^2 \frac{l_c}{r_{ik}} \vec{e}_{ik}, \quad (1)$$

где: $r_{ik} \ll l_c$ – радиус-вектор, проведенный от i -ого «витка» индуктора к k -ому

«витку» на торце пуансона; $l_c = \frac{l_i + l_k}{2}$, l_i – длина i -го «витка» индуктора, l_k – длина k -ого «витка» на торце пуансона, J – сила разрядного тока, протекающего по обмотке индуктора, $c = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}$, \vec{e}_{ik} – единичный вектор.

Векторная сумма сил на k -ый кольцевой элемент пуансона со стороны всех w витков принимает вид

$$\vec{F}_k = \sum_{i=1}^w 2cJ^2 \frac{l_c}{r_{ik}} \vec{e}_{ik}. \quad (2)$$



Фиг. 1.

- а) модель действия поля на пуансон,
 б) пробивка заготовки пуансоном метаемым ИМП.

Суммарная сила на все k -ые элементы на нагружаемом торце пуансона будет

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^w \sum_{i=1}^w 2cJ^2 \frac{l_c}{r_{ik}} \bar{e}_{ik} . \quad (3)$$

Составим в направлении метания дифференциальное уравнение движения пуансона под действием давления ИМП:

$$m \frac{d^2 h}{d\tau^2} = 2cJ^2 \sum_{k=1}^w \sum_{i=1}^w \frac{l_c}{r_{ik}} e_{iz} \quad (4)$$

Из фиг.1 определим

$$l_c = \pi \left[d - \frac{b}{w} (i - k) \right] , \quad (5)$$

$$r_{ik} = \sqrt{(k-i)^2 \frac{b^2}{w^2} + h^2} , \quad (6)$$

$$\cos(\bar{r}_{ik}, z) = \frac{h}{r_{ik}} , \quad (7)$$

где h – вертикальный уровень торца пуансона от индуктора.

Массу пуансона запишем выражением $m = bl_c a \rho_0$, где a – высота пуансона, ρ_0 – плотность материала пуансона.

Запишем квадрат силы тока в следующем виде:

$$J^2 = U_0^2 \frac{C_0}{L_0} \lambda^2 \sin^2 \omega t = U_0^2 C_0^2 \omega_0^2 \lambda^2 \sin^2 \omega t , \quad (8)$$

где U_0 – напряжение на батарее конденсаторов, C_0 – емкость конденсаторной батареи, L_0 – индуктивность разрядного контура, λ – коэффициент затухания тока, ω – фактическая круговая частота колебаний тока.

Введем безразмерные величины:

$$H = \frac{h}{h_0}, \quad n_1 = \frac{b}{h_0}, \quad n_2 = \frac{d}{h_0}, \quad \beta_1 = \frac{2cw^2U_0^2C_0^2\lambda^2}{mb}, \quad \tau = \omega t, \quad (9)$$

где $h_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ м – первоначальный зазор между индуктором и пуансоном, технологически обусловленный изоляционным слоем на рабочей поверхности индуктора, m – масса метаемого пуансона, β_1 – величина, являющаяся критерием подобия, учитывающая параметры разрядного контура.

Особенности концентрации поля и эффективность использования энергии поля в работе деформирования учтём коэффициентом η . Кроме того, неполное затухание волн поля в пуансоне учтём коэффициентом k_{oc} .

$$\text{Введем} \quad \beta = \beta_1 \eta k_{oc} \quad (10)$$

Уравнение (4) с учетом (5)–(10) примет вид:

$$\frac{d^2 H}{d\tau^2} = \beta n_1 \sum_{k=1}^{w=10} \sum_{i=1}^{w=10} \frac{\pi \left[n_2 + \frac{n_1}{w}(i-k) \right] H}{wH^2 + (k-i)n_1^2} \sin^2 \tau. \quad (11)$$

Формула (11) описывает смещение пуансона под действием ИМП под зоной концентрации поля.

С учетом сопротивления от встречи с матрицей дифференциальное уравнение движения пуансона на этапе разделения тонколистовой заготовки в безразмерном виде запишем в виде:

$$\frac{d^2 H}{d\tau^2} = \beta n_1 \sum_{k=1}^{w=10} \sum_{i=1}^{w=10} \frac{\pi \left[n_2 + \frac{n_1}{w}(i-k) \right] H}{w^2 H^2 + (k-i)^2 n_1^2} \sin^2 \tau - \frac{A}{mh_0 \omega_0^2}, \quad (12)$$

где A – величина, учитывающая сопротивление движения пуансона при разделении заготовки:

$$A = \tau_s 2\pi R s + \int_0^s \int_0^{\Delta l} \rho_0 v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} 2\pi(R+x) dx dz + \int_0^s \int_0^{\Delta l} \rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} 2\pi(R+x) dx dz, \quad (13)$$

где V_z – вертикальная составляющая скорости перемещения частиц металла в очаге деформации.

В выражении (13) первая составляющая учитывает усилие деформирования при пробивке отверстий с обычными малыми скоростями на прессах. Два последних составляющих представляют собой сопротивление деформированию от влияния инерционных сил, зависящих от координат точек перемещения материала в очаге пластической деформации и от времени пробивки заготовки [4]. Эти составляющие не оказывают существенного влияния при $V_{0d} \leq 200$ м/с и при ускорениях

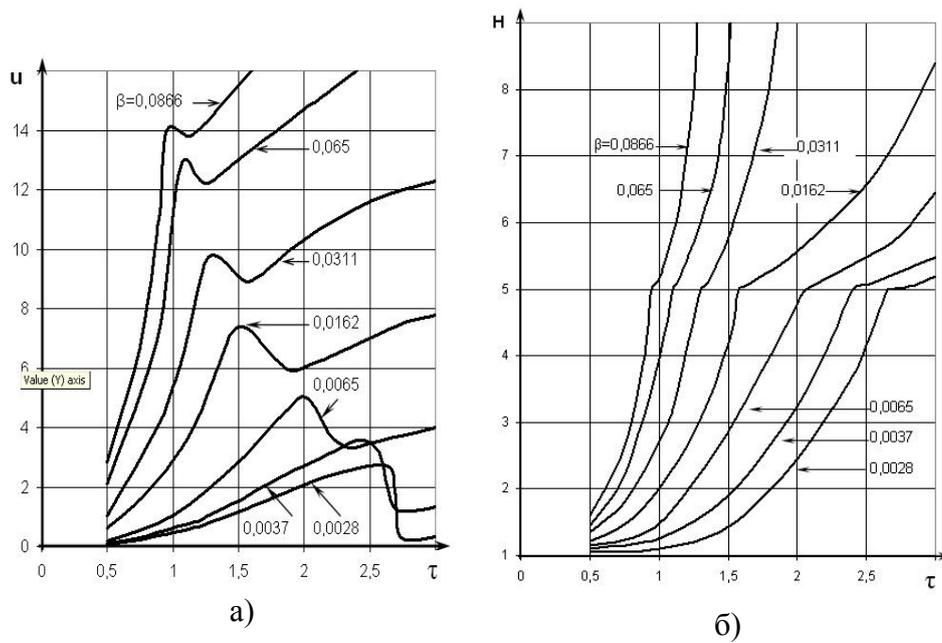
$\frac{\partial V_{0D}}{\partial t} \leq 3,5 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2$, поэтому их можно не учитывать при деформировании с использованием минимально необходимой для осуществления процесса энергии [5].

Уравнение (11) решалось при начальных условиях: $\tau = 0$, $H = 1$, $\frac{dH}{d\tau} = 0$ (для

краткости обозначим $\frac{dH}{d\tau} = u$), $n_1 = 15$, $n_2 = 80$. Диапазон изменения $\beta = 0.0028 \div 0.0866$.

При решении получены данные для расчета зависимостей $u = f(\tau)$, $H = f(\tau)$ (фиг. 2а,б): Спад кривых обусловлен встречей пуансона с матрицей, когда возникает сопротивление движению пуансона в процессе разделения заготовки. Эта часть кривых получена решением уравнения (12) при начальных условиях

$$\tau = \tau|_{H=5}, u = u|_{H=5}, H = 5, n_1 = 15, n_2 = 80 \text{ и } \frac{A}{mh_0\omega_0^2} = 4.$$



Фиг. 2. Безразмерные графические зависимости при различных значениях β ,

а) $u = f(\tau)$;

б) $H = f(\tau)$.

Полученные зависимости используются при определении параметров процесса вырубki-пробивки.

Задана заготовка (ρ_0), толщина листа (s), $\mu = 4 \cdot 10^{-7}$ Г/м, имеющаяся в наличии магнитно-импульсная установка (ω, C). Необходимо выбрать инструмент

и необходимые параметры процесса для пробивки отверстия (d) в следующей последовательности.

1. Выбор схемы, где путь метания до встречи с матрицей $h_3 = 4 \cdot 10^{-3} - 15 \cdot 10^{-3}$ м.

2. Выбор инструмента (концентратор магнитного поля, матрица, пуансон).

3. Определение режима процесса для определённых параметров рассчитываем $u = f(\tau)$ и $H = f(\tau)$ по уравнениям (11,12) и диапазону изменения β , соответствующего возможному диапазону энергии на имеющемся в наличии МИУ. Выбираем момент соударения метаемого пуансона с матрицей $\tau_c \approx 1,5 \div 2,5$, когда заготовка прижата к матрице магнитным полем вспомогательного индуктора. Из теоретических и экспериментальных исследований для разделения алюминиевой заготовки толщиной $s = 1 \cdot 10^{-3}$ м при ожидаемой скорости соударения $V_0 = 100$ м/с определяем безразмерную скорость по формуле:

$$u = \frac{dH}{dt} = \frac{d \frac{h}{h_0}}{d\omega t} = \frac{1}{\omega h_0} \frac{dh}{dt} = \frac{V_0}{\omega h_0} = \frac{100}{31400 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 3,187.$$

Из кривых $u = f(\tau)$ и $H = f(\tau)$ выбираем кривые с $\beta = 0,0037$, т.к. именно на них найдётся рабочая точка с $\tau = 2,4$, $u \approx 3,5$, $H = 5$, что близко совпадает с найденными выше параметрами процесса. Строим наложенный график (фиг.3) зависимостей $u = f(\tau)$, $H = f(\tau)$ кривых с $\beta = 0,0037$ и $s = 1$ с зависимостями: $P = f(t)$ – давлением магнитного поля в зависимости от времени и $J = f(t)$ – силой разрядного тока в зависимости от времени.

Уточняем V_0 , соответствующую $u = 3,5$ по графику $u = f(\tau)$ для $\tau = 2,4$: $V_0 = u h_0 \omega = 3,5 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 31400 \approx 110$ м/с. Рассчитываем концентратор по методике, приведенной в работе [5], при этом становятся известными w, η, Φ и другие параметры. Определяем кинетическую энергию метаемого пуансона в момент встречи с матрицей по формуле $W_{мп} = \frac{mV_0^2}{2}$; определяем работу деформирования

(A_D) по формуле, приведенной в работе [6]; определяем в первом приближении потребную для процесса пробивки запасаемую в конденсаторной батарее энергии

(W_0) по формуле $W_0 = \frac{A_D}{\eta_{мп}}$, принимая к.п.д.=10%, т.е. $\eta_{мп} = 0,1$ (может быть и

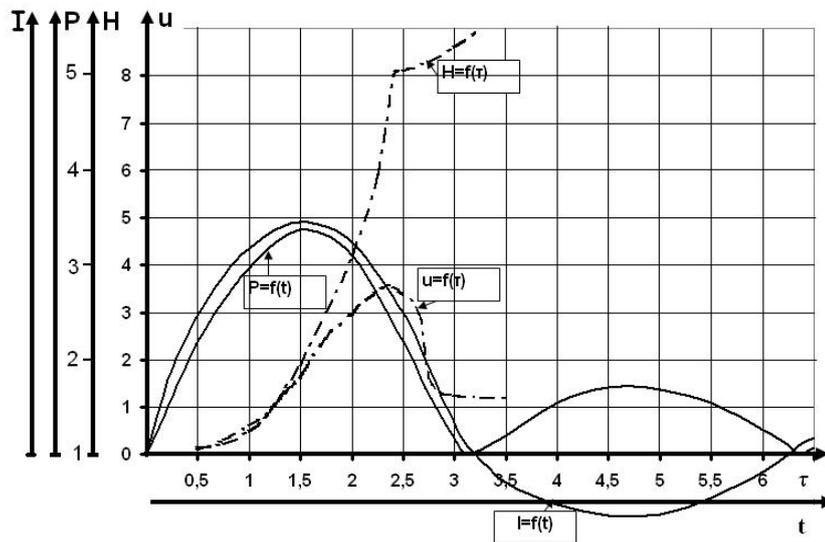
выше, что уточнится в процессе практики деформирования с метанием пуансона) или

по формуле $W'_0 = \frac{W_{мп}}{k_{oc} \eta}$ (значения W_0 и W'_0 должны быть близки друг к другу).

Определяем напряжение на конденсаторной батарее для данной установки по

формуле $U_0 = \sqrt{\frac{2W'_0}{C_0}}$; производим зарядку конденсаторной батареи до расчетного

напряжения, осуществляем пробную корректировку U_0 , запасаемую энергию W_0 и уточняем параметр β .



Фиг. 3. Характер зависимости силы разрядного тока, давления поля от времени и безразмерные зависимости скорости и смещения пуансона для $s = 1$ при $\beta = 0,0037$.

Следует отметить, что под воздействием сильного ИМП в формуле (13) следовало бы учесть явление уменьшения предела текучести (τ_s) электропроводного пластического материала в два и более раза [7]. Более того, уменьшение τ_s сопровождается нелинейностью процесса, что сильно усложняет учёт действительного характера сопротивления материала разделению. Учитывая тонкостенность заготовки, можно было бы принять осреднённое значение τ_s в зависимости от магнитного поля и времени. Однако строгое решение данного вопроса усложняет расчёты и в конечном итоге значения τ_s будут колебаться в определённых пределах, но не превышающих его начального значения.

Таким образом, при меньших значениях τ_s на самом деле сопротивление движению пуансона при разделении заготовки значительно уменьшается, это говорит в пользу того, что потребная запасаемая энергия в конденсаторной батарее, а следовательно, и начальная скорость разделения (V_0) уменьшаются по сравнению с приведёнными выше расчётами, что, в свою очередь, означает ещё большее ожидаемое увеличение к.п.д. процесса. Для каждого конкретного случая увеличение коэффициента полезного действия окончательно могут быть получены и уточнены на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыплаков О.Г. и др. Опыт формирования металлических деталей сложной конфигурации. ЛДНТП, 1968. 24 с.
2. Lesley L., Seyler. Automation. 1970. 17. 5. P. 69-72.
3. Кононенко В.Г., Ананян В.А. Экспериментальные исследования к анализу процесса вырубki-пробивки тонкостенной листовой заготовки импульсным магнитным полем, сконцентрированным по контуру вырубki. //Самолетостроение. Техника воздушного флота. 1980. Вып. 47. С.112-118.
4. Кононенко В.Г., Ананян В.А. К анализу динамики процесса вырубki-пробивки тонкостенной листовой заготовки импульсным магнитным полем, сконцентрированным по контуру вырубki. // Обраб. металлов давлением в машиностроении. 1982. Вып.18. С.3-8.
5. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: „Вища школа“, 1977. 168с.
6. Ананян В.А. Деформированное состояние в очаге деформации на кромке отверстия и работа деформирования при магнитно-импульсной пробивке тонколистовой заготовки //Изв. НАН РА и ГИУА.Сер.ТН. 2002. Т.55. №3. С.385–391.
7. Беклемишев Н.Н., Шапиро Г.С. О законе деформирования и критерии разрушения пластического проводящего материала с учетом воздействия импульса электромагнитного поля.– Нелинейные модели и задачи механики деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1984. С.41–51.

Государственный аграрный
университет Армении

Поступила в редакцию
25.01.2008